



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**CCMN – INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**INFLUÊNCIA DE SOLUÇÕES DE CLORETO DE SÓDIO**  
**SOBRE AS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS**

**Kadson Matheus Barreiros Gomes**

**Orientadora: Profa. Dra. Helena Polivanov**

**Rio de Janeiro**  
**Março de 2014**

KADSON MATHEUS BARREIROS GOMES

# INFLUÊNCIA DE SOLUÇÕES CLORETO DE SÓDIO SOBRE AS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação em Geologia, Instituto de  
Geociências, da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Helena Polivanov

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha orientadora Helena Polivanov, não apenas pela sua imensa paciência, mas também por estar sempre presente para ensinar, ajudar e motivar.

Ao professor Emilio Velloso Barroso e ao geólogo Rafael Silva Ribeiro por cederem amostras, informações e apoio ao longo de todo o trabalho.

Às Engenheiras civis Andrea Ferreira Borges e Maria de Fatima Almeida Seabra Cavalcanti, pelo apoio e ajuda concedidos para realização dos ensaios.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através das bolsas concedidas.

Ao geólogo Thiago Telles Alvaro pelo suporte dado na coleta das amostras em campo.

A geóloga Alessandra Inohã de Abreu Sivertsen Kwamme por diversos suportes técnicos.

Ao colega de graduação e amigo Maurício Bulhões Simon, pelo imprescindível apoio na realização dos ensaios, na confecção dos gráficos e textos, além de sua amizade e apoio pessoal que sempre me estimularam a seguir em frente.

Aos meus amigos por estarem sempre me apoiando e me motivando a seguir em frente.

A minha família pelo amor incondicional sem o qual eu não teria chegado onde cheguei.

A Deus pela minha existência.

## RESUMO

O uso de água destilada para representar os fluidos intersticiais dos solos durante ensaios de caracterização geotécnica é incompatível com a multiplicidade de substâncias a que estão submetidos. Este trabalho apresenta resultados de ensaios para a determinação dos Limites de Atterberg e ensaios de compactação Proctor Normal em solos argilosos de alta plasticidade acrescidos de NaCl, representantes de situações naturais e de origem antrópica. Concentrações de 1,2% (12.000ppm) simulam situação de aterro sanitário; 3,5% (35000ppm), efeitos de salinidade costeira; e 15% (150.000ppm) e 25% (250.000ppm), efeitos de concentração supernormal de NaCl, por ação antrópica ou acumulação natural. O trabalho em questão visa estabelecer uma relação entre as concentrações das soluções de NaCl adicionadas e o comportamento geotécnico do solo estudado, através da análise da variação dos limites de Atterberg e da eficiência da compactação. O aumento da concentração salina provocou: mudança de classe de solo de argila de alta plasticidade (CH) para argila de baixa plasticidade (CL) redução do limite de Atterberg até 150.000ppm; não foram observados efeitos significativos sobre os ensaios de compactação. A atuação dos sais na estrutura das argilas parece reduzir a distância entre as camadas de argilominerais, ao agregá-las, aumentando artificialmente a granulometria, diminuindo os limites de Atterberg. O efeito da salinidade sobre as propriedades geotécnicas relaciona-se com a floculação até um limite, que ficaria entre 35.000ppm e 150.000ppm; valor a partir do qual as solo não teria seu comportamento afetado pela adição de soluções salinas.

Palavras-chave: Salinidade, Limites de Atterberg, Compactação, Comportamento Geotécnico, Solo, Argila.

## **ABSTRACT**

Distilled water used as interstitial fluids in geotechnical characterization studies of soils is inappropriate to the variety of environments and substances to which they are submitted. This article presents results of Atterberg Limits determination tests and normal proctor tests for high plasticity soils with added NaCl, representing natural and anthropic situations. Concentration of 1,2% (12.000ppm) simulates landfill situations; 3,5% (35.000ppm), effects of coastal salinity; 15% (150.000ppm) and 25% (250.000ppm), supernormal NaCl concentration effects, either for anthropic action or natural accumulation. This work intends to establish a relationship between the added NaCl concentrations and geotechnical behavior of the studied soil thru the variation of Atterberg Limits and Compression tests. The increase of saline concentration lead to: soil class change from high plasticity clay (CH) to low plasticity clay (CL); reduction of Atterberg limits until 150.000ppm; haven't been observed significantly modifications on the soil's behavior in proctor tests. The salinity seems to reduce the distance between clay mineral layers, clustering them artificially augmenting granulometry, which reduces Atterberg limits. Atterberg limit behavior is related to flocculation until a concentration between 35.000ppm-150.000; concentrations greater than this would no longer keeping affecting soil behavior.

Key-words: Salinity, Atterberg limits, Compression, Geotechnical Behavior, Soil, Clay.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objetivo .....	3
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. Coleta de amostras .....	3
2.2. Caracterização granulométrica .....	5
2.3. Preparo das soluções salinas .....	6
2.4. Limites de Atterberg .....	7
2.5. Ensaios de compactação Proctor Normal .....	11
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>13</b>
3.1. Caracterização granulométrica .....	13
3.2. Limites de Atterberg .....	14
3.3. Ensaios de compactação Proctor Normal .....	17
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>19</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>21</b>

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores comuns de Limites de Atterberg para argilominerais (modificado de Mitchell & Soga, 2005). .....	8
Tabela 2 - Valores de LL e IP de alguns solos brasileiros (Souza Pinto, 2006).....	8
Tabela 3 - Variações e especificações do ensaio de compactação Proctor. ....	13
Tabela 4 - Frações granulométricas e seus respectivos percentuais. ....	13
Tabela 5 - Limites de Liquidez e Plasticidade para as concentrações utilizadas no trabalho. .	14
Tabela 6 - Caracterização granulométrica referente tanto ao trabalho de Silos (2010) quanto ao de Gomes & Moreira (2011) (Modificado de Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011)). ..	17
Tabela 7 - Efeito de soluções salinas nas concentrações de 12.000ppm e 35.000ppm sobre LL e LP. Resultados de Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011) respectivamente. ....	17

## Índice de Figuras

Figura 1 - Efeito de formação de partículas de maior massa devido ao efeito dos íons (Cooper, 2001).....	1
Figura 2 - Uma unidade octaédrica, ° - hidroxilas, • - alumínio ou magnésios; e uma unidade tetraédrica, ° - oxigênios, • - silícios (Thogersen, 2001). ....	2
Figura 3 - Localização do ponto de coleta, Bairro da Glória, Distrito de Cascatinha, Petrópolis (Ribeiro, 2013). ....	4
Figura 4 - Aspecto do horizonte B do solo residual estudado. ....	4
Figura 5 - Série de peneiras para peneiramento das frações grossas do solo. ....	5
Figura 6 - Caracterização granulométrica por decantação. (a) Agitando a solução. (b) Densímetro e termômetro. (c) Solução de um litro de solo, água e defloculante.....	6
Figura 7 - (a) Solo homogeneizado na cápsula de porcelana; (b) solo disposto no aparelho de Casagande e o cinzel; (c) solo dividido em duas partes. ....	10
Figura 8 - Imagem da massa de solo dividida antes do ensaio e depois do ensaio (ABNT NBR 6459).....	10
Figura 9 - (a) Bola moldada a partir do solo e (b) cilindro rompido após rolamento em vidro esmerilhado.....	10
Figura 10 - Exemplo de curva de compactação (modificado de Silos, 2010).....	11
Figura 11 - Compactação Proctor (a) peneiramento, (b) pesagem do solo a ser compactado, (c) homogeneização, (d) compactação.....	12
Figura 12 - Diagrama de Shepard (1954) reproduzido de Dias (2004), com a indicação da classificação do solo em estudo.....	14
Figura 13 - Carta de Plasticidade com a classificação SUCS.....	15
Figura 14 - Gráfico comparativo do LL e do LP de acordo com a concentração de NaCl. ....	16
Figura 15 - Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal. ....	18
Figura 16 - Efeito de soluções salinas sobre ensaios de compactação Proctor Normal (Gomes & Moreira 2011).....	19



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações gerais

Os solos tem seu comportamento geotécnico condicionado por múltiplos fatores, tais como a composição granulométrica, os minerais presentes, forma das partículas, estrutura, porosidade, permeabilidade e ambiente de formação. As características básicas dos ambientes de formação dos solos, bem como aquelas a que ficam sujeitos depois da sua formação, podem influenciar sensivelmente o comportamento geotécnico destes. O solo pode ser considerado um sistema trifásico: fase sólida, referente às partículas; fase gasosa, normalmente o ar; e fase líquida, representada pela água.

As cargas elétricas das partículas coloidais, carregadas negativamente, podem neutralizar-se sob a influência da adição de íons de carga positiva oposta: um eletrólito, por exemplo, o cloreto de sódio, quando se dissocia em água, origina íons positivos e negativos ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ ). Pelo efeito dos íons  $\text{Na}^+$  em solução, os colóides neutralizam suas cargas e chocam entre si, mantendo-se unidos pela ocorrência de forças de aderência (Figura 1). Desta maneira podem começar a formar flocos de massa maior, que tendem a se depositar.

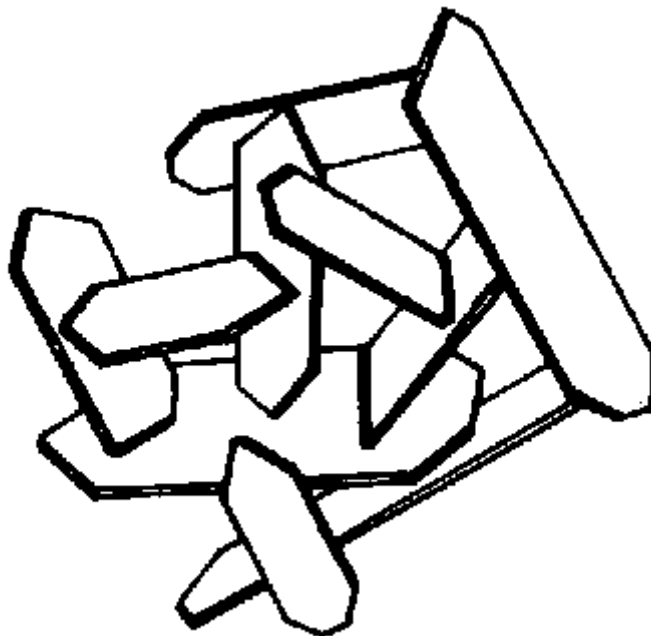


Figura 1 - Efeito de formação de partículas de maior massa devido ao efeito dos íons (Cooper, 2001).

Os ensaios que caracterizam geotecnicamente os solos comumente utilizam água destilada, representando os fluidos presentes nos poros. No entanto, não simula os fluidos

reais presentes nos interstícios dos solos, já que sua composição pode variar amplamente de acordo com o ambiente de formação, e é quase invariavelmente diferente da água destilada. Como exemplos podem-se citar uma argila sedimentar formada em ambiente marinho, em que o fluido dos poros detém composição salobra, e ainda materiais argilosos utilizados como camada selante em aterros sanitários, onde os fluidos estão expostos a agentes químicos diversos.

A estrutura dos argilominerais é composta por camadas octaédricas e tetraédricas alternadas. Uma unidade octaédrica fundamental consiste em seis átomos de oxigênio ou grupos de hidroxilas arranjados octaedricamente em torno de cátions de magnésio, alumínio ou ferro. Camadas octaédricas consistem nestas unidades (moléculas) ligadas uma a outra. Já uma unidade tetraédrica consiste em quatro átomos de oxigênio envolvendo um de silício; uma camada tetraédrica é formada por três ou quatro oxigênios compartilhados formando uma rede hexagonal (Figura 2).

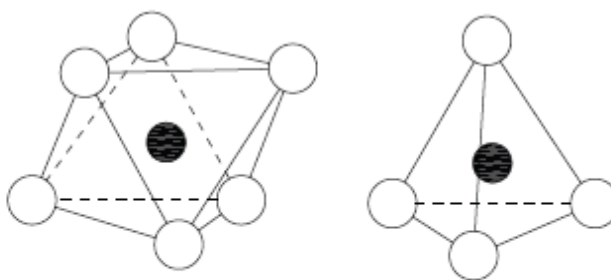


Figura 2 - Uma unidade octaédrica, ° - hidroxilas, • - alumínio ou magnésio; e uma unidade tetraédrica, ° - oxigênios, • - silício (Thogersen, 2001).

Os argilominerais são divididos em dois grupos: aquele que é estruturado por uma camada octaédrica e uma tetraédrica (1:1) e o que é composto por uma camada octaédrica e duas tetraédricas (2:1). Alguns dos argilominerais mais comuns incluem caulinita, illita e esmectita.

O solo do estudo em questão é predominantemente caolinítico, embora possa conter alguma esmectita e illita. Caulinita é o argilomineral 1:1 mais comum, e suas forças repulsivas são pequenas, tornando difícil a penetração de água e cátions entre as suas unidades e, portanto, impedindo a expansão do mineral. Somente uma pequena substituição isomórfica pode ocorrer. Esmectita e illita são argilominerais 2:1, podendo, devido a sua estrutura que tem forças repulsivas maiores, absorver mais cátions e água (assim ocorrendo expansão e contração do mineral). Íons positivos de diferentes tipos podem ser trocados dentro da estrutura dos argilominerais. A taxa de desprendimento depende do quanto parecidos são os

íons entre si, do seu raio iônico e sua valência. A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) representa a capacidade de troca destes íons, e é baixa para as caulinitas e alta para ilitas e esmectitas.

Os ensaios de compactação e os limites de Atterberg estão entre os mais comuns dentro da geologia de engenharia. Os ensaios de compactação devido a ampla utilização de solos compactados em diversos tipos de obra como estruturas *liners* na base de aterros sanitários, no caso de solos compactados, nestes casos o efeito da possível união das partículas sob efeito dos íons e as mudanças nas propriedades causadas por essa mudança que a salinidade provoca, podem ser evidenciados, ao observar mudanças no peso específico na curva de compactação. Os limites de Atterberg são ensaios de extrema utilidade devido à sua realização simples, mas que pode fornecer uma grande quantidade de informações.

## **1.2.Objetivo**

Neste trabalho, procurou-se verificar a influência de soluções salinas sobre as propriedades geotécnicas dos solos. Dessa forma, foram analisados ensaios geotécnicos, limites de Atterberg e ensaios de compactação Proctor Normal, com solos sob influência de diferentes concentrações de NaCl, algumas simulando situações naturais e outras de superconcentração, para servir de parâmetro de comparação.

Procurou-se também comparar os resultados obtidos em outros trabalhos com os resultados do presente estudo com o objetivo de se avaliar mais profundamente e em condições distintas o efeito da salinidade sobre as propriedades do solo.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1.Coleta das amostras**

A amostra utilizada para o estudo foi coletada no Bairro da Glória, Distrito de Cascatinha (Figura 3), Petrópolis (RJ).

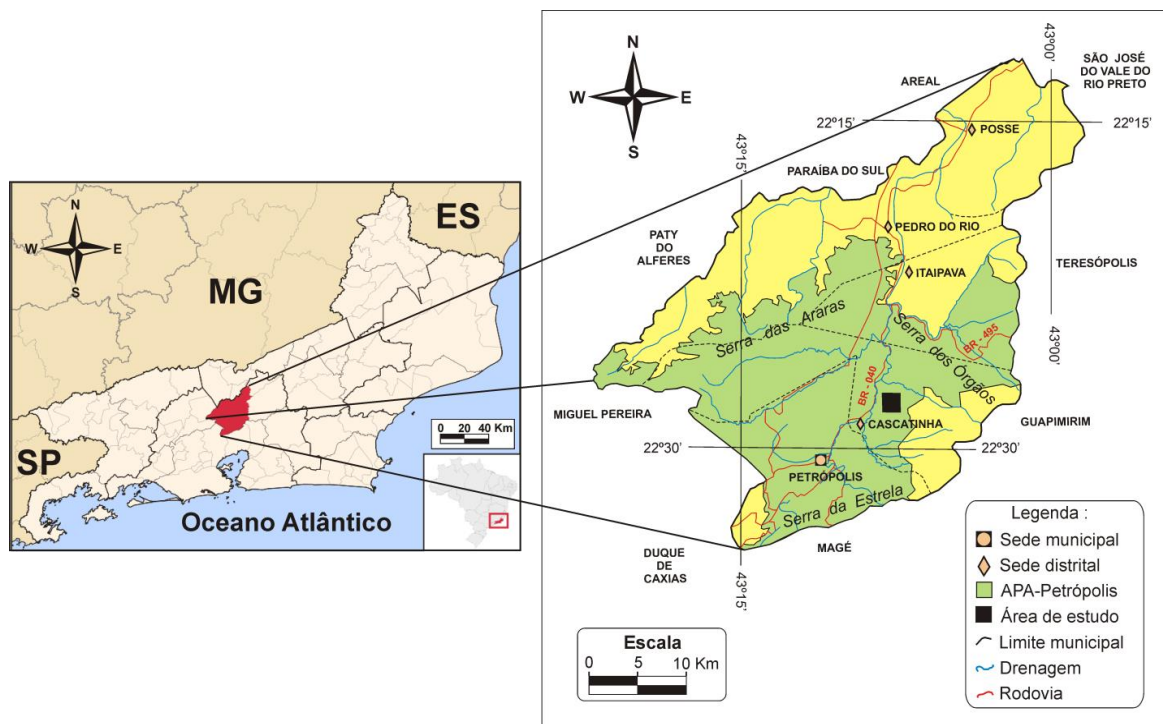


Figura 3 - Localização do ponto de coleta, Bairro da Glória, Distrito de Cascatinha, Petrópolis (Ribeiro, 2013).

Trata-se de um horizonte B de um solo residual de gnaiss (CPRM, 2012), sendo possivelmente um latossolo, segundo as observações de campo, (Figura 4) cuja coleta de material deformado in situ foi realizada com auxílio de enxadas e pás. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos de amostras plásticos e transportadas para o laboratório, postas para secar à temperatura ambiente, destorroadas e separadas para as diversas análises.



Figura 4 - Aspecto do horizonte B do solo residual de gnaiss estudado.

A área na qual o material foi coletado insere-se no contexto da Suíte Serra dos Órgãos (Tupinambá, 1999), que inclui granada-hornblenda-biotita gnaisses graníticos a tonalíticos, de granulação grossa, equigranulares e foliação descontínua, dada por aglomerados centimétricos de biotita e hornblenda (CPRM, 2012).

## 2.2.Caracterização granulométrica

Pode-se conceituar granulometria como a medida do tamanho e distribuição dos grãos de um determinado solo ou até mesmo um sedimento, esta propriedade é umas das características físicas fundamentais a ditar o comportamento geotécnico de um determinado material.

A caracterização granulométrica do solo foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR-7181-1984, o qual preceitua como método de análise o peneiramento e a decantação. A metodologia do peneiramento, resumidamente, consiste em uma série de peneiras (Figura 5), cujas aberturas são definidas pela norma supracitada, onde as partículas de maior tamanho no material vão sendo progressivamente retidas e posteriormente a massa do material retido em cada peneira é definida através de uma balança, que neste caso possuía uma resolução de 0,01g. O peneiramento caracteriza o material em estudo principalmente quanto às frações mais grossas das partículas, pedregulho, areia e silte.



Figura 5 - Série de peneiras para peneiramento das frações grossas do solo.

A metodologia da decantação (Figura 6 a, b, c) serve para quantificar as frações mais finas, silte e argila, e consiste, sucintamente, de uma proveta na qual são colocadas as frações finas do solo previamente peneirado e preparado com defloculante (hexametáfosfato de sódio) onde a solução solo com defloculante é adicionada de água destilada até que o volume total da solução atinja um litro. Uma vez completado este passo, a solução é agitada durante um minuto e então colocada em repouso. Durante intervalos de tempo pré-determinados a densidade do fluido é medida com auxílio de um densímetro, sendo possível determinar a quantidade de material em solução e a quantidade de material decantado, calculando com o auxílio da Lei de Stokes o percentual de argila e silte dentro do solo em questão. Durante o processo a temperatura ambiente é medida com auxílio de um termômetro, pois esta interfere na sedimentação e por consequência nos cálculos a serem realizados.

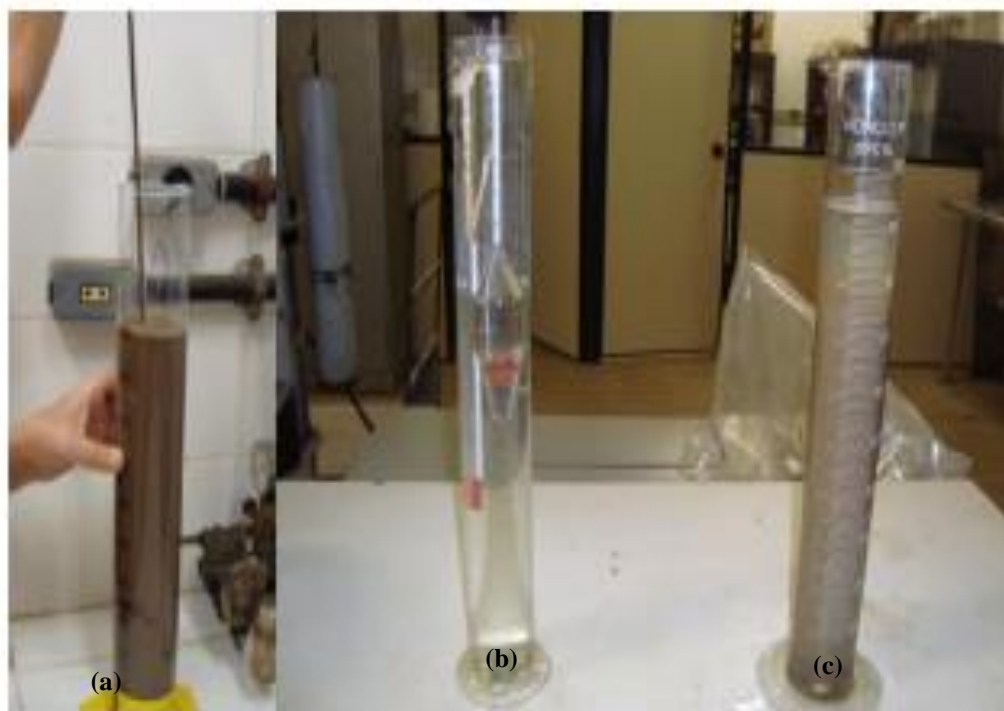


Figura 6 - Caracterização granulométrica por decantação. (a) Agitando a solução. (b) Densímetro e termômetro. (c) Solução de um litro de solo, água e defloculante.

### 2.3.Preparo das soluções salinas

Cada uma das soluções salinas foi preparada com a quantidade correspondente a concentração de NaCl a 1,2%, 3,5%, 15% e 25%. A concentração de 1,2%, ou 12000ppm, simula uma situação de aterro sanitário (Segato, 2000), enquanto 3,5%, ou 35000ppm, simula efeitos de salinidade costeira, já que se trata da concentração marinha



aproximada de NaCl. Os valores de 15% e 25% procuram avaliar os efeitos de uma concentração supernormal de NaCl, resultado de ação antrópica ou acumulação natural.

Para NaCl a 1,2% utilizou-se 12 g de cloreto de sódio puro (58,44 g/mol) completando o recipiente com 988 mL de água destilada, que totalizará os 988 g que faltam para 1000 g da solução. O mesmo foi realizado para as soluções a 3,5%, 15% e 25%, mas com 35 g, 150 g e 250 g de NaCl puro e o restante de água destilada até 1 L, respectivamente. As misturas foram agitadas vigorosamente, principalmente para as maiores concentrações, para que não houvesse formação de precipitado (mistura incompleta). Depois os recipientes são tampados para que não haja fuga da água por evaporação e, portanto, mudança nas concentrações originais.

## **2.4.Limites de Atterberg**

O comportamento dos solos sob o ponto de vista da Engenharia é caracterizado não apenas pela distribuição granulométrica. A fração fina tem grande importância nesse comportamento. O comportamento de partículas com superfície específica tão grande quanto as argilas em contato com a água é bastante diversificado, principalmente em relação à estrutura mineralógica. Como forma mais prática de estudar a influência mecânica dos argilominerais, uma análise indireta do comportamento de solos finos na presença de água foi desenvolvida por Arthur Casagrande, e depois padronizada pela ABNT. A partir destes ensaios são obtidos os Limites de Atterberg, que são usados para identificação, descrição e classificação de solos coesivos, e constituem a base para o estudo de suas propriedades mecânicas. Dependem dos mesmos fatores físicos que determinam a resistência e permeabilidade dos solos (forma das partículas, superfície específica e uniformidade (Terzaghi, 1925).

Os limites de Atterberg ou de consistência abordados neste trabalho são: Limite de Liquidez (LL) é o teor em água acima do qual o solo passa do comportamento plástico para o líquido e Limite de Plasticidade (LP), teor de umidade abaixo do qual o solo passa do comportamento plástico para o semi-sólido, em que perde a capacidade de ser moldado e passa a ficar quebradiço; ambos os limites são arbitrários. Índice de Plasticidade, ou IP, é a diferença entre LL e LP. Trata-se de um índice que mede a plasticidade dos solos e fisicamente representa o valor da amplitude da quantidade de água em que o solo exibe características plásticas.

**Tabela 1** apresenta-se uma relação entre argilominerais e Limites de Atterberg (modificado de Mitchell & Soga, 2005).

Mineral <sup>a</sup>	LL(%)	LP(%)
Esmectita (1)	100-900	50-100
Nontronita (1)(2)	37-72	19-27
Ilita (3)	60-120	35-60
Caulinita (3)	30-110	25-40
Haloisita hidratada (1)	50-70	47-60
Haloisita desidratada(3)	35-55	30-45
Atapulgita(4)	160-230	100-12
Clorita(5)	44-47	36-40
Alofana(não seca)	200-250	130-14

Tabela 1 - Valores comuns de Limites de Atterberg para argilominerais (modificado de Mitchell & Soga, 2005).

Alguns valores de Limites de Atterberg de alguns solos brasileiros são apresentados na Tabela 2, por Souza Pinto (2006).

Solos	LL %	IP %
Residuais de arenito (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaiss	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 40	5 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

Tabela 2 - Valores de LL e IP de alguns solos brasileiros (Souza Pinto, 2006).

Realizaram-se os Limites de Atterberg conforme normas ABNT (LL: NBR 6459 e LP: NBR 7180) em amostras de solo nas seguintes condições: sem acréscimo de NaCl e com soluções preparadas com a solução de água destilada com NaCl a 1,2%, 3,5%, 15% e 25%.

A determinação do Limite de Liquidez é realizada a partir da contagem de golpes realizada em um aparelho de Casagrande (Figura 7a) de uma massa de solo previamente seca que havia passado na peneira ABNT nº 40 acrescida de água destilada (ou as soluções no caso dos ensaios com sais). A amostra é inicialmente acrescida de pequenos incrementos de água



destilada em uma cápsula de porcelana e amassada lentamente até se obter uma massa homogênea. Daí é transferida para a concha no aparelho de Casagrande (Figura 7b), moldando-a de forma que a parte central tenha no máximo 10 mm de espessura (o excesso de solo é retornado para a cápsula). Divide-se a massa de solo em duas partes com um cinzel, criando uma ranhura no centro (Figura 7c). A concha deve ser golpeada contra o aparelho em queda livre, girando a manivela a cerca de 2 voltas por segundo, até que a ranhura esteja fechada ao longo de 13 mm em sua porção central (Figura 8), momento em que pequena quantidade de material junto às bordas é transferido para um recipiente para a determinação da umidade. Este procedimento é repetido com quantidades crescentes de água (ou solução), de modo que o primeiro ponto deve ser aquele com o maior número de batidas e os seguintes apresentam número de batidas decrescente. O número de batidas geralmente está entre 15 e 35, em 5 pontos, porque a partir daí é gerado um gráfico no qual as ordenadas (em escala logarítmica) são os números de golpes e as abscissas (em escala aritmética) são os teores de umidades correspondentes. Ajustando-se uma reta aos pontos obtidos, o teor de umidade correspondente a 25 golpes contido na reta é o Limite de Liquidez.

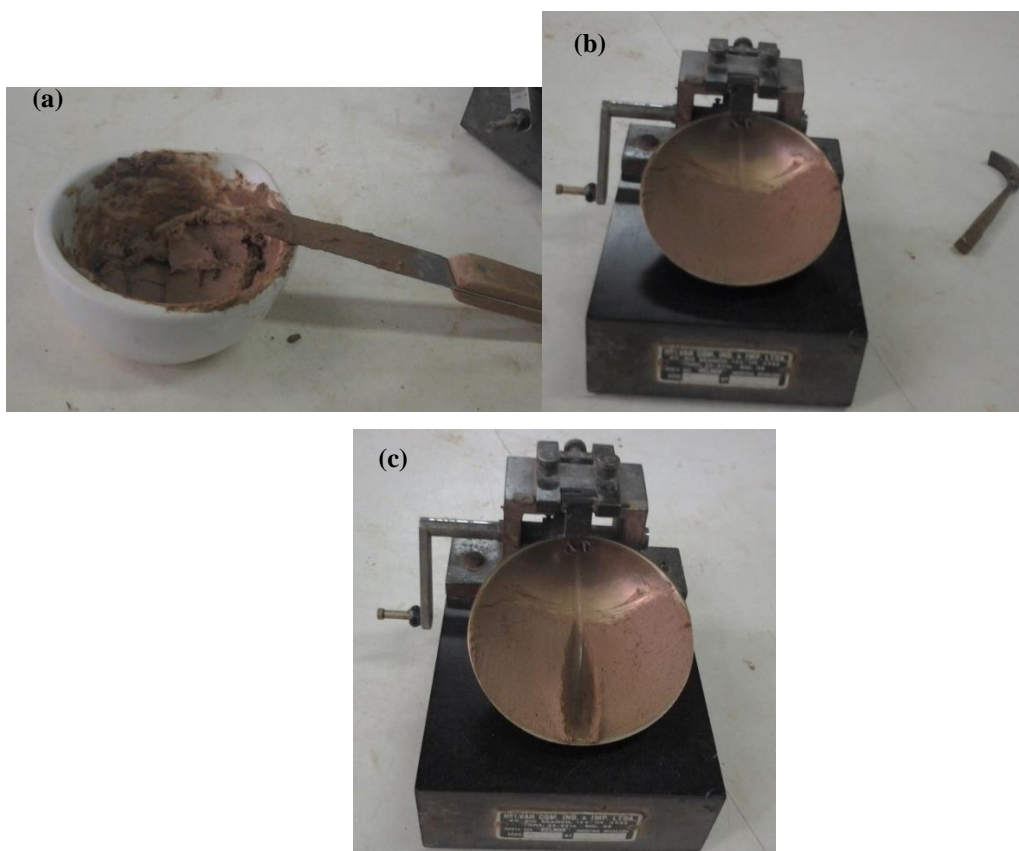


Figura 7 - (a) Solo homogeneizado na cápsula de porcelana; (b) solo disposto no aparelho de Casagande e o cinzel; (c) solo dividido em duas partes.

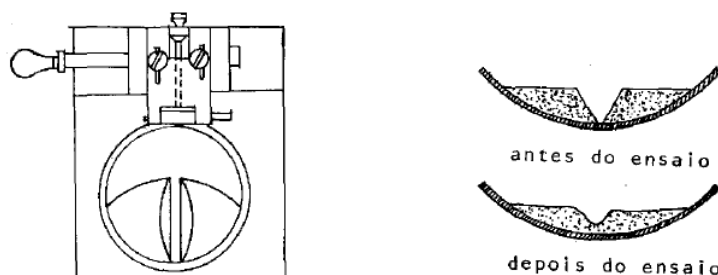


Figura 8 - Imagem da massa de solo dividida antes do ensaio e depois do ensaio (ABNT NBR 6459).

O ensaio para a obtenção do Limite de Plasticidade pode utilizar parte do material utilizado no primeiro ponto do Limite de Liquidez ou pode utilizar o solo passado na peneira ABNT nº 40 misturado à água destilada ou solução salina até formar uma mistura homogênea, da mesma maneira que a etapa inicial do ensaio para a obtenção do Limite de Liquidez. Deve-se tomar 10 g da amostra assim preparada na cápsula de porcelana e formar uma bola (Figura 9a), que deve ser rolada sobre uma placa de vidro esmerilhado com pressão suficiente da palma da mão para dar a ela uma forma de cilindro. O cilindro deve se fragmentar com diâmetro de 3 mm e comprimento da ordem de 100 mm (Figura 9b), e ser transferido para recipiente para a determinação na umidade. O procedimento deve ser realizado pelo menos três vezes. A média dos três valores de umidade, que não devem divergir da mesma em mais de 5%, é o Limite de Plasticidade.

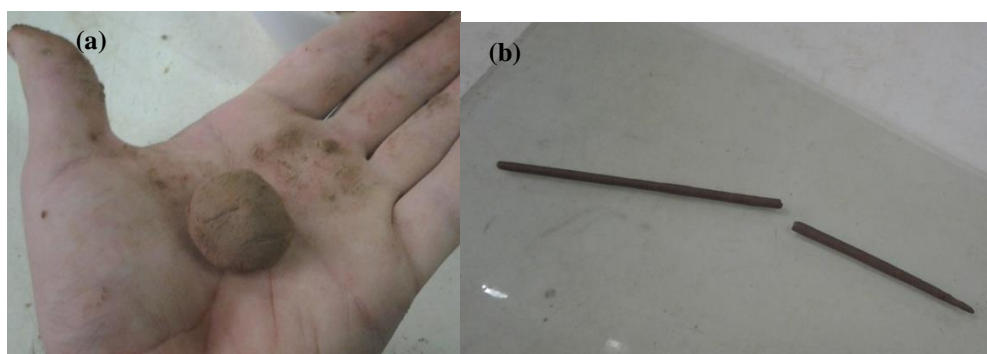


Figura 9 - (a) Bola moldada a partir do solo e (b) cilindro rompido após rolamento em vidro esmerilhado.

Para cada uma das concentrações a solução salina foi adicionada ao solo, da mesma forma que os ensaios preconizados pela ABNT, mas homogeneizada por um tempo mais curto

que aquele indicado para que, com a evaporação da água, não haja mudança na concentração da solução salina.

## 2.5. Ensaio de compactação Proctor Normal

Os ensaios de compactação realizados neste trabalho foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 7182/1986 – Ensaio de Compactação. Neste ensaio procura-se determinar a umidade ótima, aquela no qual o peso específico é máximo, através da curva de compactação (Figura 10). A umidade ótima também divide a curva em ramo seco, onde a compactação não é máxima devido à falta de umidade, e ramo úmido onde o excesso de umidade não permite que o peso específico seja máximo.

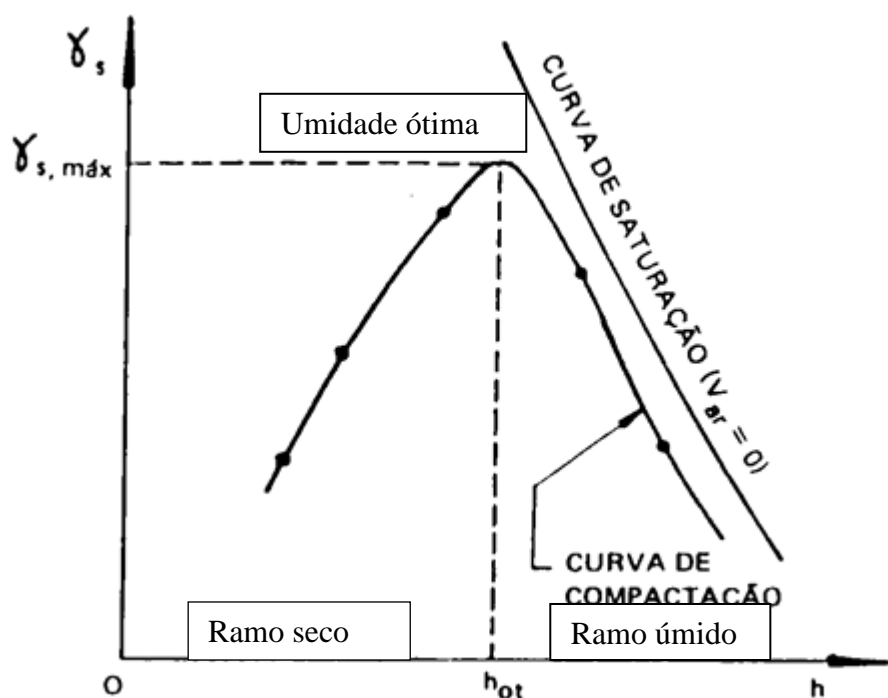


Figura 10 - Exemplo de curva de compactação (modificado de Silos, 2010).

A metodologia deste ensaio consiste em, primeiramente peneirar o solo já destorroado na peneira ABNT nº 10 (Figura 11a), então se separa a quantidade necessária para que o solo quando úmido certamente complete o cilindro sem deixar espaços vazios, uma vez que um dos princípios do ensaio é utilizar um cilindro de volume conhecido para conhecer a quantidade de solo dentro do mesmo, no presente estudo a quantidade adotada foi de 3kg (Figura 11b). Em seguida o solo é homogeneizado com o fluido em questão (Figura 11c), que

pode ser água destilada ou uma solução salina, e finalmente compacta-se o solo utilizando o soquete e o número de golpes pré-determinados pela norma do ensaio segundo a energia desejada (Figura 11d).



Figura 11 - Compactação Proctor (a) peneiramento, (b) pesagem do solo a ser compactado, (c) homogeneização, (d) compactação.

Com o solo compactado e se conhecendo o volume e o peso do cilindro, é possível determinar a massa e o volume de solo, avaliando-se assim a eficiência da compactação. A umidade e o peso específico do material são determinados a partir de três amostras retiradas do solo de dentro do cilindro, de preferência o próximo do centro do cilindro, para tornar o resultado mais preciso.

O ensaio pode ser realizado em três níveis energia e com cilindros de diferentes tamanhos como pode ser observado na Tabela 3. No presente estudo se utilizou o ensaio com energia normal e em um cilindro grande, já que este minimiza a influência de possíveis heterogeneidades no material. Os ensaios de compactação Proctor Normal foram realizados com água destilada, para servir de amostra de controle, com soluções salinas a 1,2% e 3,5%, para se avaliar o efeito da salinidade sobre a compactação.

Cilindro	Características de cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
	Soquete	pequeno	grande	grande
Pequeno	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
	Soquete	grande	grande	grande
Grande	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/86.

Tabela 3 - Variações e especificações do ensaio de compactação Proctor.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1.Caracterização Granulométrica

Podem-se determinar os percentuais de cada fração granulométrica como observado na Tabela 4.

Fração	Porcentagem
Argila	43%
Silte	12%
Areia Fina	11%
Areia Média	29%
Areia Grossa	5%
Areia Total	45%
Pedregulho	0%

Tabela 4 - Frações granulométricas e seus respectivos percentuais.

A partir desses dados utilizou-se o gráfico textural segundo Shepard (1954), o qual resultou na classificação do material como algo entre areia argilosa. (Figura 12).

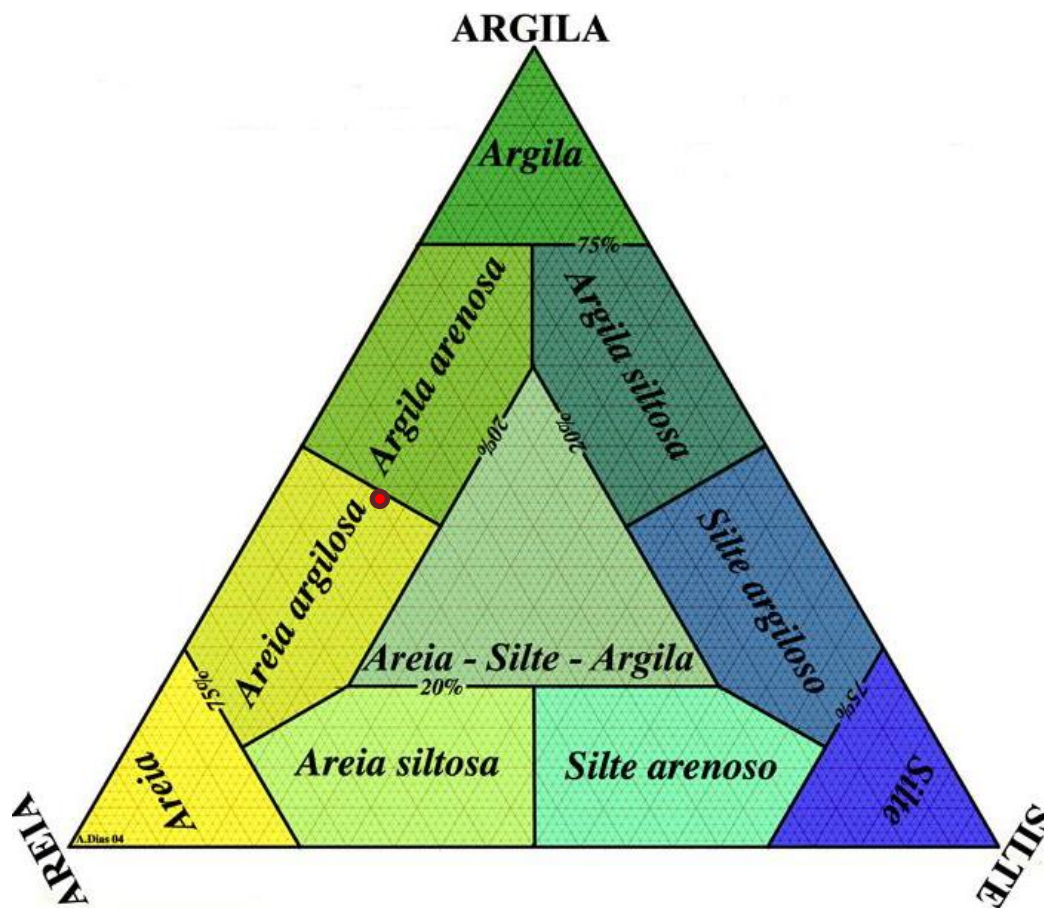


Figura 12 - Diagrama de Shepard (1954) reproduzido de Dias (2004), com a indicação da classificação do solo em estudo.

### 3.2.Limites de Atterberg

Segundo os resultados obtidos através dos ensaios para determinar os Limites de Atterberg, os quais podem ser observados na Tabela 5, o solo em estudo poderia ser classificado como altamente plástico (Caputo, 1988).

Concentrações	LL	LP	IP
0,0%	57	31	26
1,20%	54	25	29
3,50%	52	25	27
15%	50	27	23
25%	50	25	25

Tabela 5 - Limites de Liquidez e Plasticidade para as concentrações utilizadas no trabalho.

O Índice de Atividade de Skempton é uma grandeza adimensional do solo que classifica o solo segundo a atividade de suas argilas, sendo medido pela razão entre Índice de Plasticidade (IP) e percentual de argila. No solo estudado este é igual a 0,6, tratando-se de uma argila de baixa atividade (Souza Pinto, 2006).

Ao plotar as características do solo na Carta de Plasticidade, percebeu-se que o material utilizado neste trabalho demonstrou características próximas a de uma argila de alta plasticidade (CH), pela classificação de SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), como pode ser observado na Figura 13.

Ainda na Figura 13, percebe-se que a ampliação da concentração de NaCl gera uma tendência do solo que é inicialmente argila de alta plasticidade (CH) em se tornar argila de baixa plasticidade (CL), devido à tendência geral de redução do limite de liquidez.

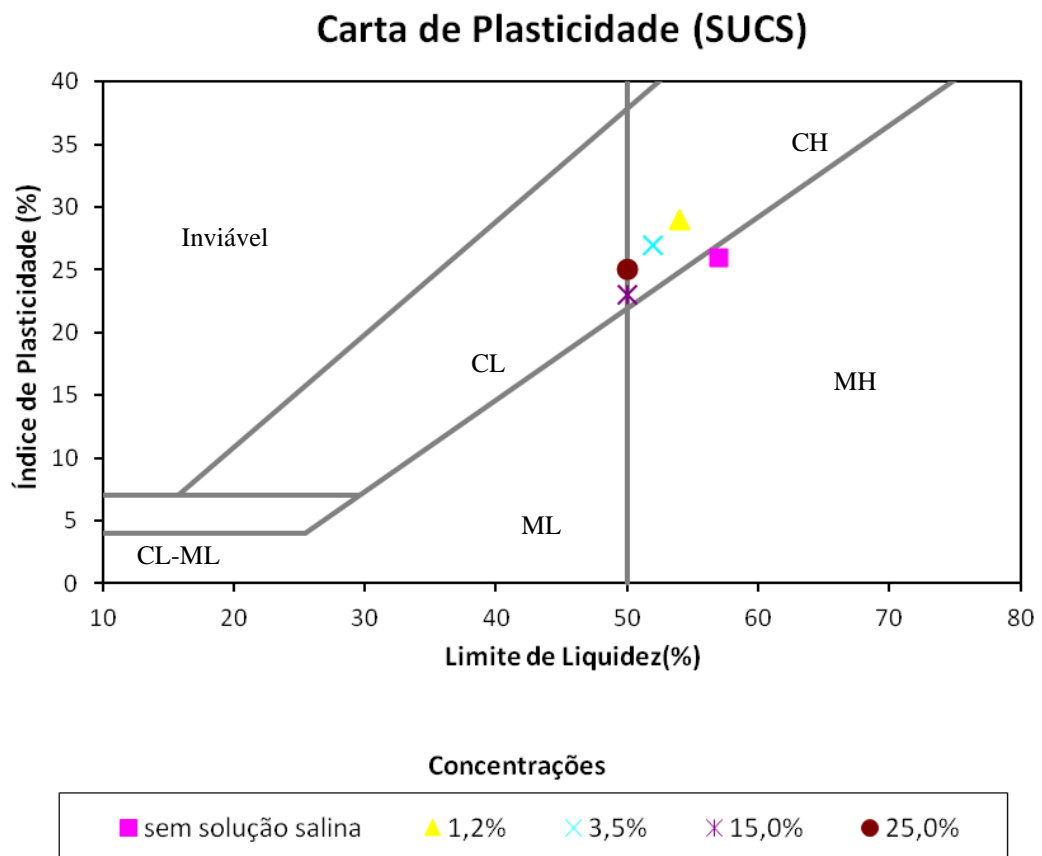


Figura 13 - Carta de Plasticidade com a classificação SUCS.

Observou-se que o aumento da concentração salina provoca redução significativa no limite de liquidez das amostras já em baixas concentrações e que, para soluções com concentrações muito altas, não houve mudança significativa, como pode ser observado na Figura 14.

Ainda na Figura 14 observa-se que o limite de plasticidade apresenta um comportamento semelhante ao limite de liquidez apresentando redução considerável já em baixas concentrações, sem ocorrer reduções relevantes nas concentrações supernormais. Entretanto, o resultado não se demonstrou tão claro quanto os resultados do limite de liquidez, devido às flutuações no resultado. Esta mesma flutuação acarretou o comportamento irregular observado no índice de plasticidade.

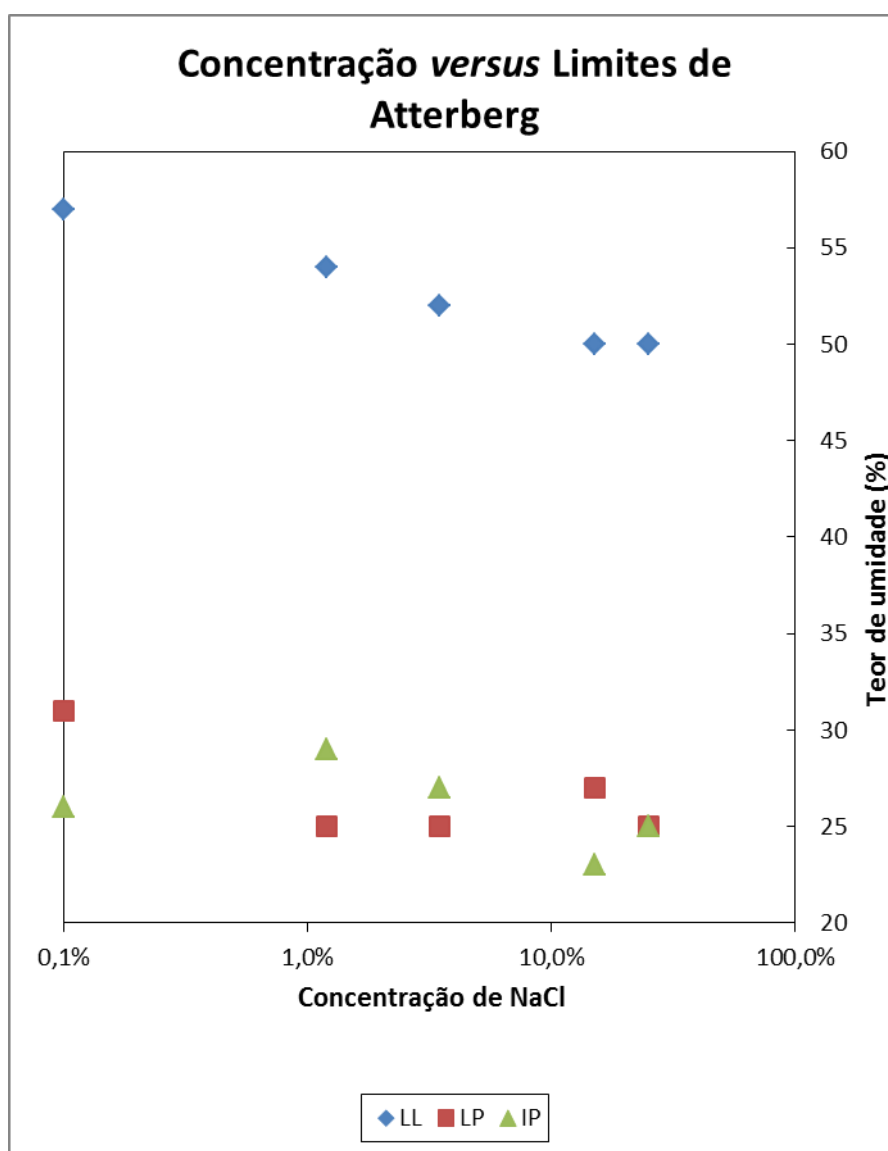


Figura 14 - Gráfico comparativo do LL e do LP de acordo com a concentração de NaCl.



Arasan e Yetimonglu (2008) encontraram resultados semelhantes com relação ao limite de liquidez, ao utilizarem argilas CH e soluções salinas com KCl e  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Do mesmo modo, trabalhos de Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011), cujo material apresenta mineralogia das argilas composta predominantemente de caulinita com traços de illita e granulometria observada na Tabela 6, demonstraram reduções semelhantes nos limites de Atterberg ao utilizarem soluções salinas com concentrações de NaCl nas concentrações de 12.000ppm e 35.000ppm, respectivamente (Tabela 7).

Fração	Porcentagem
Argila	9%
Silte	37%
Areia Fina	8%
Areia Média	9%
Areia Grossa	21%
Areia Total	38%
Pedregulho	16%

Tabela 6 - Caracterização granulométrica referente tanto ao trabalho de Silos (2010) quanto ao de Gomes & Moreira (2011) (Modificado de Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011)).

Amostra	LL	LP
Sem solução salina	51%	29%
Solução Salina 12.000ppm	50%	28%
Solução Salina 35.000ppm	46%	26%

Tabela 7 - Efeito de soluções salinas nas concentrações de 12.000ppm e 35.000ppm sobre LL e LP. Resultados de Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011) respectivamente.

### 3.3.Ensaio de Compactação Proctor Normal

Como pode ser observado na Figura 15, não houve mudança significativa nos resultados devido à influência de salinidade.

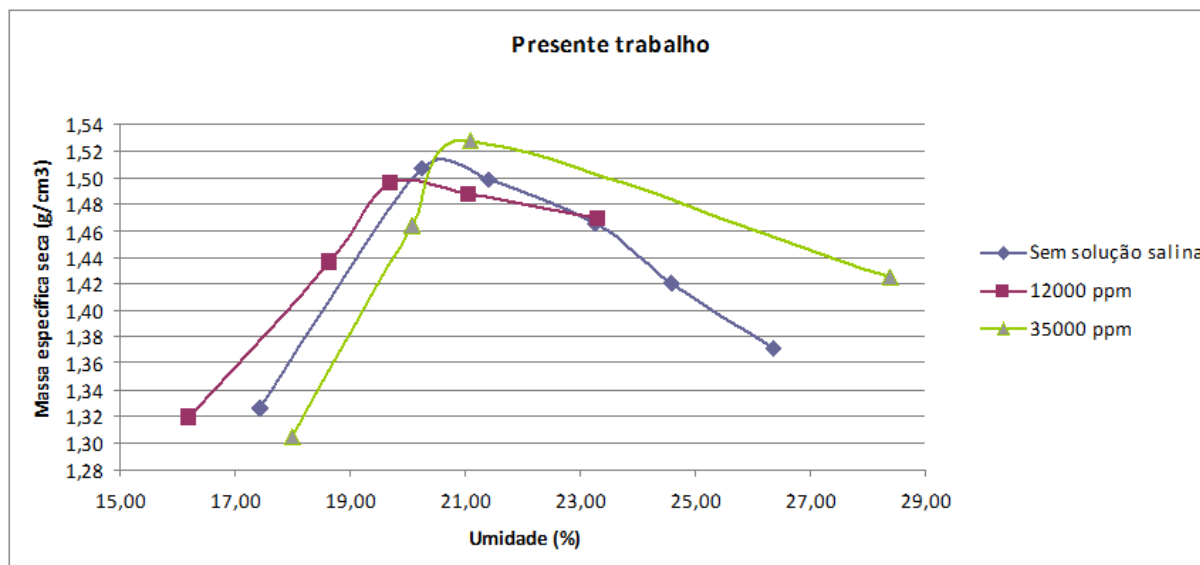


Figura 15 - Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal.

Estes resultados diferem daqueles encontrados em Silos (2010) e Gomes & Moreira (2011), onde a eficiência da compactação foi reduzida sob efeito da salinidade (Figura 16). Esta diferença está possivelmente ligada a uma diferença nas metodologias, uma vez que nestes trabalhos após a homogeneização do material com a solução salina, este foi colocado em repouso em uma câmara úmida, para não perder umidade, durante quarenta e oito horas, e no presente estudo não houve este repouso. Dessa forma, há indicativos que o efeito dos sais sobre as propriedades geotécnicas dos solos pode estar condicionado ao tempo de exposição do solo às soluções salinas.

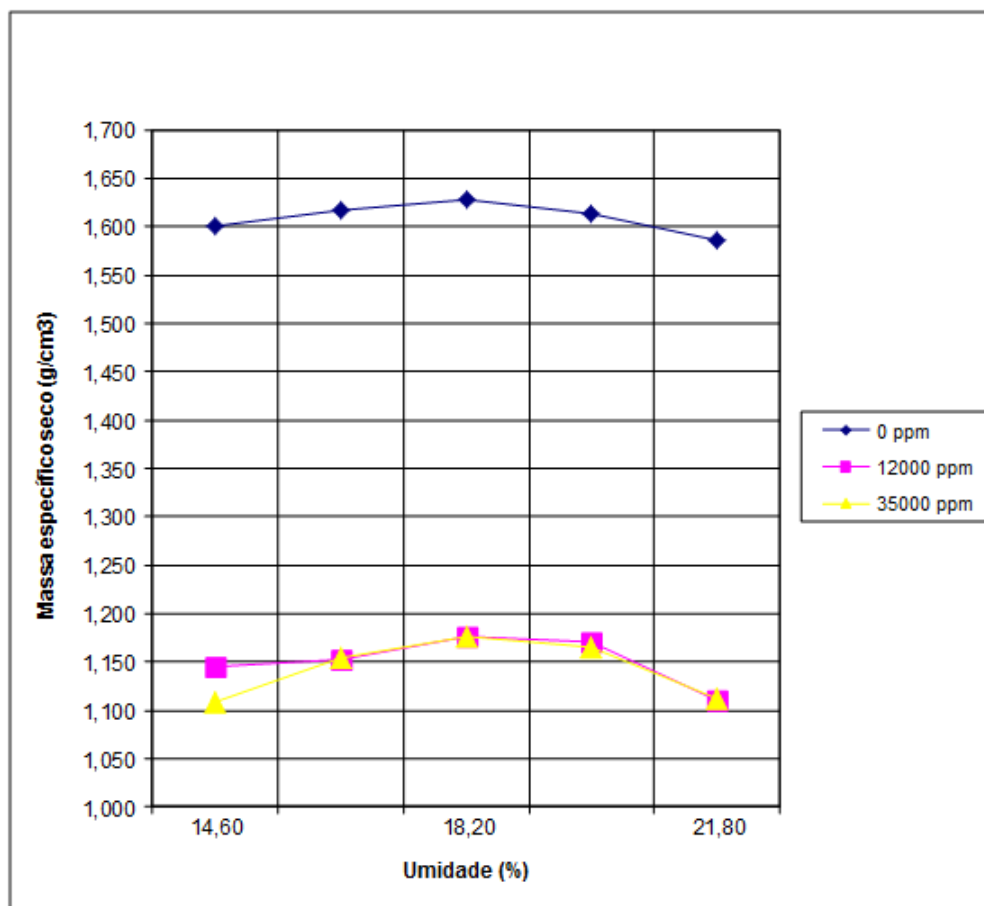


Figura 16 - Efeito de soluções salinas sobre ensaios de compactação Proctor Normal ( Gomes & Moreira 2011).

#### 4. CONCLUSÕES

A salinidade afetou as propriedades geotécnicas do solo. O efeito das soluções salinas é evidente logo em baixas concentrações, o que foi evidenciado pelo seu limite sobre os limites de Atterberg, os quais apresentaram queda significativas já com concentrações de 1,2% e 3,5% de NaCl. Entretanto foi observada uma queda proporcional à adição porcentagem de sais nos valores de 15% e 25%, o que indica que o efeito das soluções salinas é proporcional a quantidade de sais presentes, até a concentração onde o efeito é máximo, a partir do qual o acréscimo destas concentrações não mais afeta as propriedades geotécnicas do material.

Neste trabalho não foi observado efeito relevante de soluções salinas sob os ensaios de compactação, isto pode estar relacionado à ausência de um tempo de repouso do material em contato com os sais após a homogeneização, esta possibilidade é sustentado pelo fato de que nos trabalhos observados na bibliografia o efeito da compactação foi observado em ensaios de

compactação nos quais houve um repouso de 48h. Sendo assim, é provável que o tempo de exposição seja um dos fatores determinantes do efeito das soluções sobre as propriedades geotécnicas dos solos.

As alterações nas características dos materiais observadas neste trabalho causadas pela presença de sais estão provavelmente ligadas ao efeito que os íons dissociados causam sobre as argilas, levando-as a agruparem-se e se comportarem como partículas maiores, o que explicaria tanto a redução nos limites de Atterberg, quanto a perda de eficiência na compactação observada na bibliografia.

Por último, é de grande importância ressaltar que os efeitos da salinidade não inviabilizam projetos em área onde esta esteja presente, contudo, seus efeitos sobre as propriedades dos solos, que muitas vezes são negligenciados, devem ser levados em consideração e que ensaios condizentes estas características devem ser aplicados.

## 5. REFERÊNCIAS

ARASAN, S. & YETIMOGLU, T. (2008). “*Effect of Inorganic Salt Solutions on the Consistency Limits of Two Clays*”. Turkish Journal of Environmental Science, 32, pp.107 – 115.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). “*NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio*”. ABNT Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). “*NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio*”. ABNT Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). “*NBR 7181: Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio*”. ABNT, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). “*NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio*”. ABNT, Rio de Janeiro.

CAPUTO, H.P. (1988). “*Mecânica dos solos e suas aplicações*”. 6ª. Ed.: LTC. Rio de Janeiro, pp.112.

COOPER, S. J. (2001). “*Interfaces, Colloids and Gels*”. Department of Chemistry, University of Durham. Disponível em: <<http://community.dur.ac.uk/sharon.cooper/lectures/colloids/interfacesweb1.html>> Visualizado em 7 de fevereiro de 2014.

CPRM (2012) “*Geologia e recursos minerais da folha Três Rios SF.23-Z-B-I, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000*” / Cláudia Valladares... [et al.] ;organizador Luiz Carlos da Silva. – Belo Horizonte. 136 p. ; Mapa Geológico, escala 1:100.000 (série Geologia do Brasil), versão digital em CD-ROM, textos e mapas.

DIAS, J.A. (2004). “*A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos: Uma Introdução à Oceanografia Geológica*”, pp.84.

GOMES, K.M.B., MOREIRA, R.F. (2011). “*Avaliação de Salinidade na resistência de solos compactados utilizados em aterros sanitários*” XXXIII Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural. Igeo, UFRJ

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. (2005). “*Fundamentals of Soil Behavior*”. 3rd edition, John Wiley & Sons.

RIBEIRO, R.S.(2013). “*Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos*”, Tese (Doutorado em Geologia), IGeo, Departamento de Geologia, UFRJ, pp. 302

SEGATTO, L.M., SILVA, C.L. (2000) “*Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru*”, XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RS, pp.1-9.

SILOS, V.R. (2010) “*Influência da Salinidade no Comportamento Mecânico de Solos Compactados*”. Trabalho de Conclusão de Curso, IGeo, UFRJ.

SOUZA PINTO, C. (2006). “*Curso Básico de Mecânica de Solos*”. 3ª. Ed. São Paulo – Oficina de Textos, 2006.

THOGERSEN, L. (2001) “*Effects of Experimental Techniques and Osmotic Pressure on the Measured Behavior of Tertiary Expansive Clay*”. Aalborg University, 1.

TUPINAMBÁ M. (1999.) “*Evolução tectônica e magmática da faixa Ribeira na região serrana do estado do Rio de Janeiro*”. São Paulo. Tese de doutorado, IG/USP, São Paulo, 221pp.